

研究最前線 JT-60SA リサーチプラン

10. 理論モデルとシミュレーションコード

林 伸彦, 福山 淳¹⁾

日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門, ¹⁾京都大学

(原稿受付日: 2012年 8月27日)

ITER と原型炉におけるプラズマの予測・制御や運転シナリオの設計をめざした理論モデルとシミュレーションコードの検証は, JT-60SA 計画の主要な目的の1つである. 同時に, 検証の対象となる JT-60SA 実験を準備するためにも, 既存のコードによるモデリングや新しいコードの開発, 効率的なデータ交換のプラットフォームの開発等が必要となる. これらの活動は, 日本だけでなくすでに開始されている日欧協力も交えて行われ, 日欧のブロードアプローチ計画に基づいて設置された高性能計算機を活用する.

Keywords:

theoretical model, simulation, integrated modeling, plasma control, simulator

10.1 ITER および原型炉で果たすべき役割

理論モデルとシミュレーションコードは, 高ベータ・高自発電流割合の燃焼プラズマで現れると予想される様々な相互結合現象を理解し, ITER や原型炉で現れるその様なプラズマの挙動を予測するために欠かせない. また, モデルとコードは, 未だ実験が行われていないプラズマの挙動を予測し, その予測を確認するための実験を策定するために利用することもできる. JT-60SA 実験で理論予測が確認できれば, 高ベータ・高自発電流割合のプラズマに対するモデルとコードの妥当性検証につながる. 検証されたモデルとコードは ITER の燃焼プラズマの予測に用いられ, ITER の燃焼プラズマ実験でさらに検証することができる. JT-60SA と ITER の両方の実験でモデルとコードを検証できれば, 原型炉における燃焼プラズマの予測の信頼性を向上させることができる. 図1は, 上記で述べたモデルとコードによる予測および検証による改良の計画を示す.

ITER と原型炉におけるプラズマの予測精度を上げるには, JT-60SA の特性を生かしたモデルとコードの検証を効率的に行わなければならない. そのためには JT-60SA の実験が始まる前はもちろん実験中にもモデルとコードを開

発・改良していかなければならず, 人的資源はもちろん計算機資源が必要である. 後者に関しては, 例えば日欧の幅広いアプローチ計画に基づいて設置されたコンピュータシミュレーションセンターにある高性能計算機 (BA-IFERC-CSC, <http://www.iferc.org/csc/csc.html> 参照) を活用する. このベタフロップス級計算機は, スパコン性能ランキングに入る (2012年 6月時点で12位) 規模であり, 磁気核融合研究のために利用できる.

10.2 JT-60SA における研究項目

理論モデルとシミュレーションコードは, ITER と原型炉に要求される研究領域を網羅し, 以下に挙げるように物理課題だけでなく工学的課題も包含しなければならない.

—物理課題:

- ・熱/粒子/運動量輸送と閉じ込め (内部・境界輸送障壁 (ITB, ETB), L-H/H-L 遷移, 低トルク入力, 低 T_i/T_e 比, ITER・原型炉相当の無次元パラメータ領域)
- ・新古典物理 (電気伝導度, ブートストラップ電流, 外部共鳴摂動磁場 (RMP) 時のトロイダル粘性, 不純物輸送)
- ・乱流 (先進的乱流計測によるジャイロ運動論的乱流コードの検証)
- ・MHD 不安定性 (新古典テアリングモードの発生と分布制御・ECCD による安定化, ELM 抑制と緩和, 回転・動的磁場制御による抵抗性壁モード (RWM) 安定化, ディスラプション)
- ・ペデスタル物理 (ITER・原型炉相当の衝突周波数領域での検証)
- ・高速粒子物理 (アルフベン固有モードと高速粒子輸送への影響, 高速粒子が励起する非局所 MHD 不安定性, 運動論的コードの開発と検証)

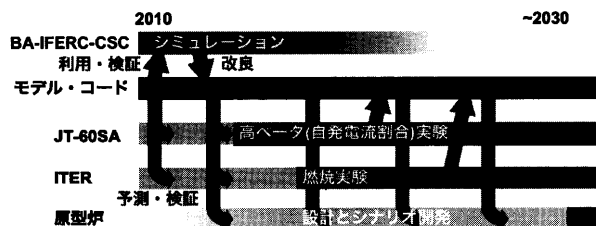


図1 理論モデルとシミュレーションコードによる予測と実験との比較による検証の計画.

- ・粒子補給／加熱・電流・回転駆動（ガスパフ、ペレット、中性粒子ビーム(NB)、電子サイクロトロン波(EC)）
- ・SOL／ダイバータ、プラズマ-壁相互作用（非接触状態、MARFE、SOL 流、不純物輸送と放射損失、熱・粒子制御、壁損耗・再堆積）
- ・運転シナリオ（着火、最適化、シャットダウン、周期的シナリオ、燃焼シミュレーション実験のモデリング）
- －工学課題：
 - ・外部コイル電流／電圧（トロイダルコイル、ポロイダルコイル、RMP）
 - ・計測モデリング
 - ・モデルに基づいた実時間制御（電流分布、鋸歯状振動、新古典テアリングモード、ELM 等）
 - ・統合制御システム（プラズマ位置・形状、熱、粒子、電流、MHD 不安定等の同時制御）

上記の課題の各々を取り扱えるコードをまず開発・改良して、各課題に関連する物理機構を理解し予測する必要がある。日欧をはじめとして世界にはすでに多くのコードがあり、それらを活用できる。既存のモデル・コードを調べ、これから開発すべき欠けているモデル・コードを明らかにして、原型炉へ向けたモデル・コードの開発計画を立てなければならない。そして、複数の物理機構が結合した現象を理解して自己調整するプラズマの複雑な挙動を予測するためには、上記課題を記述するモデル・コードをモジュール化し、それらを統合したコードを開発する必要がある。この統合コードは、運転シナリオの構築や統合化した制御システムの開発をするために不可欠である。統合コードを使うことにより、研究者は実際の実験前に運転シナリオを評価することができるようになる。また、ペレットやRMPによるELM緩和等のITERや原型炉で重要となる制御課題を調べる必要がある。加えて、原型炉においては利用できる計測が限られることから、燃焼プラズマの動的挙動を確実かつ正確に予測できるトカマクシミュレータを開発しなければならない。すべての重要な物理・工学課題を網羅した統合コードはトカマクシミュレータになりえる。そのようなトカマクシミュレータを計測装置、コイルシステム、加熱・電流駆動等の制御装置と組み合わせることで、原型炉のための実時間制御システムの構築に寄与することができる。特に実時間制御では計算時間を短縮する必要があるため、大規模並列処理による高速化や、正確なコードで時間をかけて得られた結果を再現できる簡易的なモデル・コードの開発が必要である。JT-60SA 実験に基づくモデリング・シミュレーション研究は、このような ITER と原型炉に利用できる燃焼プラズマシミュレータの開発をめざすべきである。

コードの検証には、精度確認（同じ現象を扱う複数のコード間ベンチマーク等）と妥当性検証（コードの結果と実験結果との比較）の2つがある。これらを効率よく行うためには、コード間のデータ交換や実験データとの比較を行うためのインターフェースを定義する共通のフレームワークを構築しなければならない。このフレームワークがあれば、コードや実験との直接比較だけでなく、様々な

コードを統合するのにも役立つ。このようなフレームワークは、日欧等の様々な活動で開発中である。日本では、核燃焼プラズマ統合コード構想（BPSI: Burning Plasma Simulation Initiative）[1]が、様々なコード間のデータ交換に使える標準的なデータセットを定義するBPSDと呼ばれるデータインターフェースに基づくフレームワークを開発した。欧州では、EFDA の Integrated Tokamak Modeling Task Force がフレームワークを開発し、すでに JT-60SA シナリオの予測モデリングを行っている。ITER 機構は、Integrated Modeling Expert Group内で、統合モデリングのためのフレームワークを評価している。これらの活動間の協力を通してJT-60SAで利用されるフレームワークの開発促進が期待できる。JT-60SA に向けて開発するフレームワークは、原型炉において標準として利用し得るものをめざすべきである。フレームワークを用いて検証を効率的に行うことができ、モデルとコードの不確実性の特定とその定量化を容易に実現できる。そして、実験の測定データを活用してモデルとコードを改良することにより、不確実性を最小化し予測の信頼性を向上させることができる。

10.3 研究計画から実験に向けて

ITER と原型炉におけるプラズマの予測精度を上げるには、JT-60SA の特性を生かしたモデルとコードの検証を効率的に行わなければならない。そのためには JT-60SA の実験が始まる前はもちろん実験中にもモデルとコードを開発・改良する必要がある。

10.3.1 実験前の研究課題

JT-60SA 実験が始まる前に、モデルとコードを開発・改良し、JT-60U や JET 等の実験データを用いて検証しておく必要がある。特に、JT-60SA のシミュレーションを行うためには、統合コードを構成する様々なコードを準備し検証しなければならない。JT-60SA の運転シナリオは、装置規模と形状が似ている JT-60U と JET の実験結果に基づいて、次の手順で開発を進める。

- －JT-60U と JET における主に NB 加熱・電流駆動の代表的なショット(Hモード、ハイブリッド、先進運転)を選択
- －実験・シミュレーションのデータ交換方法を構築
- －日欧のモデル・コードで代表的なショットのシミュレーションを行い、JT-60SA の予測の信頼性を高めるために、両方の装置の実験を再現できるモデル・コードを調べる。
- －上記で検証したモデル・コードを用いて、日欧の両方のコードで JT-60SA のシミュレーションを行う。
- －その結果に対して、MHD 安定性解析等を行う。

上記の一連の作業が終了すれば、検証されたコードを用いて、運転領域の探索、目標となるプラズマの決定、その目標となるプラズマに到達するための運転シナリオの策定等を行える。これらの計算は、BA-IFERC-CSC 計算機を用いて行える。計算機の運転スケジュールは2012年から2016年までであり、2017年以降の計算機資源を確保できるよう、できるだけ早く検討を進めなければならない。モデルとコードの検証は、同様のことを ITER のために行ってい

る ITPA 活動と協調して行うことができる。

10.3.2 実験中の研究課題

JT-60SA 実験開始後、実験データを用いてモデルとコードの検証が可能となる。特に、RWM や ITB 等の高ベータ・高自発電流割合での現象について検証できる。JT-60SA の初期研究段階では、個々のコードの検証と改良を進める。そのためには、コード開発や検証とともに適切な計測機器が使用できるようにする必要がある。乱流等の第 1 原理シミュレーションと実験との直接比較も行う。統合研究段階と拡張研究段階には、統合コードが開発され検証される。検証されたモデルとコードは、ITER 予測計算に使われ、ITER 実験における標準、ハイブリッド、定常運

転のシナリオを開発する。検証は ITER 実験でも行い、特にアルファ粒子に関連する燃焼物理を検証できる。モデルとコードを JT-60SA と ITER の両方の実験で検証できれば、原型炉における高ベータ・高自発電流割合の燃焼プラズマの挙動予測の信頼性を上げ、運転シナリオを構築できる。以上の結果、ITER と原型炉に使える総合的なトカマクシミュレータの実現につながると期待できる。

参考文献

- [1] 福山 淳, 矢木雅敏: プラズマ・核融合学会誌 81, 747 (2005).